

Manufacturing semiconductor, other finely-structured components involves setting working distance at least temporarily to less than maximum size of optical near field of emanating projection light

Publication number: DE10332112 (A1)

Publication date: 2005-01-27

Inventor(s): SCHUSTER KARL-HEINZ [DE]

Applicant(s): ZEISS CARL SMT AG [DE]

Classification:

- **international:** G02B7/28; G02B13/14; G03F7/20; H01L21/027; G02B7/28; G02B13/14; G03F7/20; H01L21/02; (IPC1-7): G03F7/20; G02B13/14

- **European:** G02B13/14; G03F7/20T16; G03F7/20T18; Y01N4/00

Application number: DE20031032112 20030709

Priority number(s): DE20031032112 20030709

Also published as:

JP2005033204 (A)

Cited documents:

DE19929403 (A1)

DE10229818 (A1)

DE69515140T (T2)

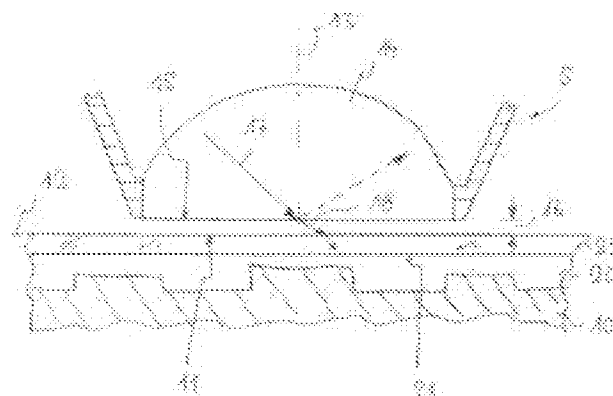
US5563684 (A)

US5121256 (A)

more >>

Abstract of DE 10332112 (A1)

The method involves providing a mask with a defined pattern in an object plane of a projection objective (5) and a light-sensitive substrate (10) near the image plane (12), illuminating the pattern with ultraviolet light of defined working wavelength, projecting an image of the pattern onto the substrate, setting a finite working distance (16) between an illumination light output surface (15) and an input coupling surface (11) and setting the working distance at least temporarily to less than the maximum size of an optical near field of the emanating light. - AN INDEPENDENT CLAIM is also included for the following: - (a) a projection illumination system.



Data supplied from the esp@cenet database — Worldwide



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 32 112 A1** 2005.01.27

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 32 112.8**

(22) Anmeldetag: **09.07.2003**

(43) Offenlegungstag: **27.01.2005**

(51) Int Cl.⁷: **G03F 7/20**
G02B 13/14

(71) Anmelder:
Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
Patentanwälte Ruff, Wilhelm, Beier, Dauster & Partner, 70174 Stuttgart

(72) Erfinder:
Schuster, Karl-Heinz, Dipl.-Ing., 89551 Königsbronn, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

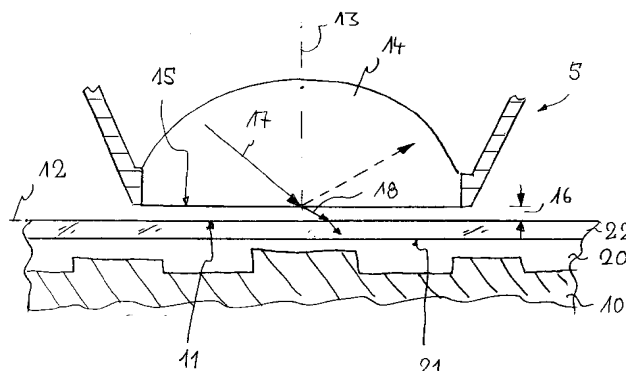
DE 199 29 403 A1
DE 102 29 818 A1
DE 695 15 140 T2
US 55 63 684 A
US 51 21 256 A
US 50 94 536 A
WO 99/15 933 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Rechercheantrag gemäß § 43 Abs. 1 Satz 1 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Projektionsbelichtungsverfahren und Projektionsbelichtungssystem**

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen wird ein Projektionsobjektiv (5) verwendet, um das Bild eines in der Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters auf ein lichtempfindliches Substrat abzubilden, das im Bereich der Bildebene (12) des Projektionsobjektivs angeordnet ist. Dabei wird zwischen einer dem Projektionsobjektiv zugeordneten Austrittsfläche (15) für Belichtungslicht und einer dem Substrat zugeordneten Einkoppelfläche (11) für Belichtungslicht ein kleiner endlicher Arbeitsabstand (16) eingestellt, der innerhalb eines Belichtungszeitintervalls mindestens zeitweise kleiner ist als eine maximale Ausdehnung eines optischen Nahfelds des aus der Austrittsfläche austretenden Lichtes. Dadurch können Projektionsobjektive mit höchsten numerischen Aperturen im Bereich $NA > 0,8$ oder darüber für die berührungsfreie Projektionslithografie nutzbar gemacht werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen sowie auf ein Projektionsbelichtungssystem zur Durchführung des Verfahrens.

Stand der Technik

[0002] Photolithographische Projektionsobjektive werden seit mehreren Jahrzehnten zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen verwendet. Sie dienen dazu, Muster von Fotomasken oder Strichplatten, die nachfolgend auch als Masken oder Retikel bezeichnet werden, auf ein lichtempfindliches Substrat, beispielsweise einen mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichteten Halbleiterwafer, mit höchster Auflösung in verkleinerndem Maßstab zu projizieren.

[0003] Zur Erzeugung immer feinerer Strukturen in der Größenordnung von 100nm oder darunter werden mehrere Ansätze verfolgt. Zum einen wird versucht, die bildseitige numerische Apertur (NA) des Projektionsobjektivs über die derzeit erzielbaren Werte hinaus in dem Bereich von $NA = 0,8$ oder darüber zu vergrößern. Außerdem werden immer kürzere Arbeitswellenlängen von Ultraviolettlicht verwendet, vorzugsweise Wellenlängen von weniger als 260 nm, beispielsweise 248 nm, 193 nm, 157 nm oder darunter. Schließlich werden noch andere Maßnahmen zur Auflösungsvergrößerung genutzt, beispielsweise phasenschiebende Masken und/oder schräge Beleuchtung.

[0004] Die Verkürzung der Arbeitswellenlänge λ in den Bereich unterhalb von 193 nm wird dadurch erschwert, dass für diesen Wellenlängenbereich nur noch wenige ausreichend transparente Materialien zur Linsenherstellung zur Verfügung stehen, insbesondere Fluoridkristalle, wie Kalziumfluorid oder Bariumfluorid. Diese Materialien sind nur begrenzt verfügbar und im Hinblick auf ihre doppelbrechenden Eigenschaften bei 193 nm und insbesondere bei 157 nm problematisch.

[0005] Bei der Erhöhung der Apertur deutlich über $NA = 0,85$ werden Grenzen bei der Winkelbelastbarkeit vor allem von bildnahen Linsen erreicht. Größere Aperturen als $NA = 0,95$ bis hin zu $NA = 1$ werden als unpraktikabel angesehen. Bei Aperturen von $NA > 1$ lassen sich die Rand- und Komastrahlen aufgrund von Totalreflexion nicht mehr aus einem Objektiv auskoppeln.

[0006] Die Verwendung von Immersionsfluiden zwischen Projektionsobjektiv und Substrat kann theoretisch dazu genutzt werden, numerische Aperturen NA größer 1 zu realisieren. Jedoch sind praxistaugliche Systeme für die Immersionslithographie bisher nicht veröffentlicht worden.

Aufgabenstellung

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Projektionsbelichtungsverfahren und ein entsprechendes Projektionsbelichtungssystem bereitzustellen, die eine Projektionsbelichtung bei höchsten numerischen Aperturen ermöglichen.

[0008] Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Verfahren für die Projektionsbelichtung mit den Merkmalen von Anspruch 1 sowie ein Projektionsbelichtungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 18 bereit. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

[0009] Ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen hat folgende Schritte:

Bereitstellen einer Maske mit einem vorgegebenen Muster in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs;
 Bereitstellen eines lichtempfindlichen Substrats im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs;
 Beleuchten des Musters mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Arbeitswellenlänge;
 Projektion eines Bildes des Musters auf das lichtempfindliche Substrat mit Hilfe des Projektionsobjektivs;
 Einstellen eines endlichen Arbeitsabstandes zwischen einer dem Projektionsobjektiv zugeordneten Austrittsfläche für Belichtungslicht und einer dem Substrat zugeordneten Einkoppelfläche für Belichtungslicht, wobei der Arbeitsabstand innerhalb eines Belichtungszeitintervalls mindestens zeitweise auf einen Wert eingestellt wird, der kleiner ist als eine maximale Ausdehnung eines optischen Nahfeldes des aus der Austrittsfläche austretenden Lichtes.

[0010] Die Erfindung schlägt somit einen berührungslosen Projektionsbelichtungsprozess vor, bei dem eva-

neszente Felder des Beleuchtungslichtes, die sich in unmittelbarer Nähe der Austrittsfläche befinden, für den lithographischen Prozess nutzbar gemacht werden. Es hat sich gezeigt, dass bei ausreichend geringen (endlichen) Arbeitsabständen trotz geometrischer Totalreflexionsbedingungen ein für die Lithographie nutzbarer Lichtanteil aus der Austrittsfläche des Objektivs ausgekoppelt und in eine unmittelbar mit Abstand benachbarte Einkoppelfläche eingekoppelt werden kann.

[0011] Es hat sich herausgestellt, dass eine Einkopplung von Beleuchtungslicht mit einer Einkoppelintensität nahe null bei numerischen Aperturen oberhalb $NA = 1$ bei einem Arbeitsabstand beginnt, der etwa dem Vierfachen der Arbeitswellenlänge λ entspricht. Somit ist bevorzugt, wenn mindestens zeitweise ein Arbeitsabstand eingestellt wird, der weniger als das Vierfache der Arbeitswellenlänge beträgt. Insbesondere sollte der Arbeitsabstand wenigstens zeitweise weniger als ca. 50% der Arbeitswellenlänge betragen. Werden mindestens zeitweise Arbeitsabstände von 20% oder weniger der Arbeitswellenlänge eingestellt, so können typische Einkoppelgrade von ca. 20% oder mehr erreicht werden. Bei den derzeit verfügbaren Photoresistmaterialien beginnt bei einem Einkoppelgrad von etwa 20% ein für die Lithographie nutzbarer Bereich. Um höhere Einkoppelwirkungsgrade zu erreichen, sollte der Arbeitsabstand für mindestens einen Teil der Belichtungszeit weniger 10% oder weniger als 5% der Arbeitswellenlänge betragen. Entsprechend haben Projektionsobjektive für die hier vorgeschlagene kontaktlose Nahfeld-Projektionslithographie vorzugsweise typische Arbeitsabstände im Bereich der Arbeitswellenlänge oder darunter, beispielsweise zwischen ca. 3 nm und ca. 200 nm, insbesondere zwischen ca. 5 nm und ca. 100 nm. Generell ist es günstig, wenn der Arbeitsabstand an die sonstigen Eigenschaften des Projektionssystems (Eigenschaften des Projektionsobjektivs nahe der Austrittsfläche, Eigenschaften des Substrates nahe der Einkoppelfläche) so angepasst ist, dass ein Einkoppelwirkungsgrad von mindestens 10% erzielt wird. Der Begriff „Einkoppelwirkungsgrad“ bezeichnet hier das Verhältnis der Transmission der maximalen Rand- bzw. Komastrahlen zur Transmission der Hauptstrahlen beim Auskoppeln aus dem Objektiv und beim Einkoppeln in den Resist, wobei hier ein Mittelwert für verschiedene Polarisationsrichtungen (s- und p-Komponente) betrachtet wird. Die Einkopplung ist von der Polarisierung und dem Brechzahlquotienten der Grenzflächenkomponenten abhängig. Für Aperturen $NA > 1,0$ liefert die tangentielle Polarisierung (vergleichbar p-Polarisation) deutlich bessere Kontraste unabhängig davon ob über ein Immersionsmedium oder über ein Nahfeld eingekoppelt wird. Je nach Abstand, Polarisationsgrad und Einfallswinkel kann der Einkoppelwirkungsgrad deutlich schwanken. Als Anhaltswerte gemittelt über verschiedene Einfallswinkel, Polarisationsrichtungen und mittlerem Brechzahlquotienten bei $NA > 1,0$ können die Werte der folgenden Tabelle angesehen werden, die den Einkoppelwirkungsgrad als Funktion des auf die Arbeitswellenlänge normierten Nahfeldabstandes bzw. Arbeitsabstandes angibt.

Nahfeldabstand [λ]	Einkoppelwirkungsgrad
1,00	0,02
0,70	0,06
0,50	0,08
0,40	0,10
0,30	0,15
0,20	0,25
0,15	0,38
0,10	0,65
0,07	0,81
0,05	0,90
0,03	0,95
0,00	1,00

[0012] Bei der Nahfeld-Projektionslithographie sollte der geringe Arbeitsabstand mit möglichst geringen örtlichen Abstandsschwankungen über die gesamte zu belichtende Fläche vorliegen, um lokale Variationen der eingekoppelten Lichtintensität so gering wie möglich zu halten. Da die Austrittsfläche des Projektionsobjektivs vorzugsweise im wesentlichen eben ist, ist für einen gleichmäßigen Arbeitsabstand eine im wesentlichen ebene Einkoppelfläche anzustreben. Um dies trotz einer gegebenenfalls unebenen Oberfläche des zu belichtenden Substrates zu erzielen, ist bei einer Ausführungsform des Verfahrens eine Beschichtung des Substrats mit mindestens einer Planarisierungsschicht zur Erzeugung einer im wesentlichen ebenen Substratoberfläche vor-

gesehen, die als Einkoppelfläche dienen kann. Die ein- oder mehrlagige Planarisierungsschicht kann durch eine Fotolackschicht bzw. Resistschicht gebildet sein. Es ist auch möglich, zusätzlich zu dem lichtempfindlichen Resistmaterial eine Schicht aus einem als Planarisierungsmedium dienenden Material aufzubringen, das für die Arbeitswellenlänge ausreichend transparent ist, selbst gegebenenfalls aber keine Strukturänderungen durch Belichtung zeigt.

[0013] Um einen geeigneten, kleinen Arbeitsabstand zwischen Austrittsfläche und Einkoppelfläche einzustellen und aufrechtzuerhalten, ist bei einer Weiterbildung eine Fokussiertechnik vorgesehen, die besonders an kleine Arbeitsabstände angepasst ist. Bei dieser Technik wird ein Messstrahl derart in einem flachen Winkel in den objektseitigen Endbereich des Projektionsobjektivs oder zwischen Austrittsfläche und Einkoppelfläche eingestrahlt, dass er nach Austritt aus einem Einkoppelsystem der Fokusdetektionseinrichtung zunächst auf einen Zick-Zack-Weg zwischen geeigneten reflektierenden Flächen einmal oder mehrmals hin und her reflektiert wird, bevor er in ein Auskoppelsystem der Fokusdetektionseinrichtung gelangt. Dadurch kann auch bei geringem Arbeitsabstand ein Messstrahl mit relativ großem Einstrahlwinkel auf die Einkoppelfläche gerichtet werden. Auf diese Weise können Fokusdetektionssysteme mit streifendem Lichteinfall auch bei Projektionsobjektiven mit sehr geringem Arbeitsabstand genutzt werden. Ein bevorzugtes Fokusdetektionssystem der Anmelderin ist in der deutschen Patentanmeldung DE 102 29 818 (entsprechend US Serial Number 10/210,051) offenbart, deren Merkmale durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht werden.

[0014] Bei einer Ausführungsform wird das letzte optische Element des Projektionsobjektivs als durchstrahlbarer, strahlführender Teil des Fokusdetektionssystems genutzt. Das letzte optische Element kann hierzu einen Randbereich haben, an dem an mindestens einer Stelle eine schräg zur optischen Achse ausgerichtete ebene Fläche zur Einkopplung und/oder Auskopplung eines Messstrahls des Fokusdetektionssystems ausgebildet ist. Über die Einkoppelflächen und Auskoppelflächen kann ein Messstrahl in das letzte optische Element einkoppeln und, gegebenenfalls nach ein- oder mehrfacher Reflektion an Grenzflächen des letzten optischen Elementes, aus der Austrittsfläche ausgekoppelt und nach Reflexion an der Einkoppelfläche des Substrates gegebenenfalls wieder in das letzte optische Element eingekoppelt werden.

[0015] Um über die gesamte zu belichtende Fläche einen möglichst gleichmäßigen, geringen Arbeitsabstand zumindest während eines Teils eines Belichtungsintervalles aufrechtzuerhalten, ist gemäß einer Weiterbildung eine besondere Haltetechnik für das Substrat, insbesondere für einen dünnen Halbleiterwafer, vorgesehen. Die Substrathaltevorrichtung erlaubt eine gesteuerte Deformation des Substrates, um einen gewünschte Form der Einkoppelfläche aktiver einzustellen. Insbesondere kann eine im wesentlichen ebene Substratoberfläche bzw. Einkoppelfläche erzeugt werden. Hierzu ist bei einer Ausführungsform eine aktive Unterstützung des Substrates auf mindestens drei Unterstützungsflächen von Unterstützungsgliedern vorgesehen. Um bei einem begrenzt deformierbaren Substrat dessen Oberfläche auf die gewünschte, beispielsweise ebene Form, zu bringen, kann die Axialposition von mindestens einer der Unterstützungsflächen relativ zu den anderen Unterstützungsflächen gezielt verstellt werden, um das darauf gelagerte Substrat zu deformieren. Um eine exakte Steuerung der Form und Lage der Einkoppelfläche durch die Substrathaltevorrichtung und deren Unterstützungsglieder zu erreichen, ist bei einer Weiterbildung vorgesehen, dass das Substrat an die Unterstützungsglieder angepresst wird, indem auf der der Einkoppelfläche abgewandten Seite des Substrats ein Unterdruck erzeugt wird. Dann wird das Substrat durch den auf der Einkoppelfläche lastenden Umgebungsdruck auf die gegebenenfalls in unterschiedlichen Höhen positionierten Unterstützungsflächen gedrückt und somit eine zielgenaue Deformation des Substrates erreicht. Die Substrathaltevorrichtung kann weiterhin so gestaltet sein, dass sie eine Axialverstellung des gesamten Substrates und/oder eine Verkippung um eine oder mehrere Achsen ermöglicht, um die Einkoppelfläche in die richtige räumliche Beziehung zur Austrittsfläche des Beleuchtungslichtes zu bringen.

[0016] Für eine aktive Unterstützung eines Substrates durch geregelte Unterstützungspunkte gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine Möglichkeit besteht darin, die zu belichtende Oberfläche, beispielsweise eine Waferoberfläche, vor der Belichtung über entsprechende Messverfahren, insbesondere interferometrisch, auf Oberflächendeformationen zu untersuchen und danach die Oberflächendeformation so zu minimieren, dass sie beispielsweise kleiner als 3 nm in Bezug auf einen Verlauf einer vorzugsweise ebenen Soll-Oberfläche wird. Danach kann fokussiert, gegebenenfalls gekippt und belichtet werden. Deformationen vor und/oder während einer Belichtung bei gleichzeitiger Fokussierung und/oder Erfassung der Oberflächenform sind ebenfalls möglich.

[0017] Aufgrund des geringen Arbeitsabstandes kann es zu verstärkter Kontamination der Austrittsfläche kommen. Hierdurch können die Abbildungsqualität und der Durchsatz an belichteten Substraten abnehmen. Um hier Abhilfe zu schaffen, ist bei einer Weiterbildung vorgesehen, dass das letzte optische Element, an dem

sich die Austrittsfläche befindet, durch eine relativ dünne, transparente Platte gebildet wird, die z.B. durch Auspressen mit dem vorletzten optischen Element, beispielsweise einer Plankonvexlinse, optisch kontaktiert werden kann. Eine solche auswechselbare Abschlussplatte kann in geeigneten Zeitabständen abgelöst, gereinigt und danach erneut angesprengt oder durch eine andere Abschlussplatte ersetzt werden. Das Ansprengen als optisch neutrale Füge-technik ist vor allem dann zu wählen, wenn Aperturen von $NA > 1$ übertragen werden sollen. Alternativ kann die dünne Platte mittels eines Immersionsmediums, beispielsweise einer Immersionsflüssigkeit, optisch an das vorletzte optische Element angekoppelt werden.

[0018] Kontaminationsprobleme können auch dadurch vermieden oder vermindert werden, dass eine transparente Planplatte auf das Substrat derart aufgelegt wird, dass eine dem Substrat abgewandte, objektivseitige Planfläche der Planplatte die Einkopplfläche bildet. Die Planplatte kann beispielsweise so auf das Substrat aufgelegt werden, dass mindestens bereichsweise Berührungskontakt mit der Oberseite des Substrates besteht. Es ist auch möglich, einen Bereich zwischen der substratseitigen Planfläche der Planplatte und der Oberseite des Substrates durch ein Immersionsmedium, z.B. reines Wasser, teilweise oder vollständig zu füllen. In jedem Fall wird bei Verwendung dieser Planplatte, die auch als Planparallelplatte oder als Hilfsplatte bezeichnet werden kann, der vom Nahfeld zu überbrückende, geringe Arbeitsabstand zwischen der objektivseitigen Planfläche der Hilfsplatte und der Austrittsfläche des Projektionsobjektivs gebildet. Bei dieser Verfahrensvariante sind die optischen Eigenschaften des Projektionsobjektivs so auf die zwischen dessen Austrittsfläche und dem zu belichtenden Substrat einzufügenden Medien abgestimmt, dass eine Abbildung mit hoher Auflösung möglich ist. Alle Platten können unabhängig davon, ob sie am Objektiv als Wechselplatte oder als von dem Objektiv losgelöste Hilfsplatte auf dem Wafer vorgesehen sind, von einer dicken, plankonvexen Objektivlinse abgespalten werden, sofern für die Platte und die Linse die gleiche oder annähernd gleiche Brechzahl vorgesehen ist. Daher sind ausreichend dicke Plankonvexlinsen als letzte Linsen des Objektivs günstig.

[0019] Die Planplatte kann so groß sein, dass im wesentlichen die gesamte zu belichtende Fläche des Substrates abgedeckt wird. Eine Planplatte dieser Art kann mehrfach verwendet werden, sollte jedoch in geeigneten Zeitabständen, beispielsweise nach jedem Belichtungszyklus gereinigt werden. Für die Halbleiterherstellung können beispielsweise Planplatten mit dem Waferdurchmesser 200 mm oder 300 mm Durchmesser verwendet werden. Bei der Belichtung erfolgt dann eine Relativverschiebung zwischen Projektionsobjektiv und Planplatte, um sukzessive alle Bereiche des zu belichtenden Substrates zu belichten. Es ist möglich, die als Hilfsplatte dienende Planplatte ohne Immersion direkt nach dem Auftragen und Trocknen der lichtempfindlichen Schicht in Vakuum aufzulegen und das Substrat mit der aufgelegten Hilfsplatte zur Belichtungsanlage zu transportieren. In diesem Fall kann die Hilfsplatte auch als Schutzplatte für das Substrat dienen, wobei ein zweifacher Durchgang durch ein optisches Nahfeld stattfindet.

[0020] Um Defokusfehler zu vermeiden, sollte der zu belichtende Teil des Substrates an der substratseitigen Planfläche bestmöglich anliegen. Kann dies durch bloßes Auflegen der Planplatte nicht erreicht werden, so ist auch eine aktive Anpressung des Substrats an die substratseitige Planfläche zur Erzeugung eines Berührungskontaktes zumindest während der Belichtung möglich. Hierzu kann beispielsweise auf der der Planplatte abgewandten Seite des Substrates ein Überdruck erzeugt werden, der das Substrat an die Planplatte andrückt. Dabei ist es nicht erforderlich, den Berührungskontakt über die gesamte Substratfläche aufrechtzuerhalten. Es ist ausreichend, wenn jeweils der zu belichtende Bereich und gegebenenfalls seine Nachbarmbereiche angedrückt werden. Daher kann es ausreichen, im Bereich der Verlängerung der optischen Achse des Projektionsobjektivs an einen Substrathalter geeignete Auslasskanäle für ein Druckfluid vorzusehen.

[0021] Es ist dafür zu sorgen, dass die Planplatte bzw. Hilfsplatte bezüglich Materialeigenschaften wie Transmission, Homogenität und Grenzflächeneigenschaften wie Pässe, Sauberkeit und Planparallelität von hoher optischer Qualität ist. Bei der Konstruktion des Projektionsobjektivs ist diese Hilfsplatte als Bestandteil des optischen Designs in die optischen Rechnungen mit einzubeziehen. Weichen die Brechzahlen eines letzten optischen Elementes des Projektionsobjektivs, beispielsweise einer Plankonvexlinse, und der Planparallelplatte voneinander ab, weil beispielsweise die Linse aus Calciumfluorid und die Hilfsplatte aus Quarzglas gefertigt ist, so ist dies in den optischen Rechnungen entweder von Anfang an oder durch spätere sphärische Anpassung zu berücksichtigen.

Ausführungsbeispiel

[0022] Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und aus den Zeichnungen hervor. Dabei können die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungsformen darstellen.

[0023] Fig. 1 zeigt schematisch eine mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlage gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

[0024] Fig. 2 ist eine schematische, vergrößerte Darstellung eines Übergangsbereiches zwischen einem bildseitigen Ende eines Projektionsobjektivs und einem zu belichtenden Substrat;

[0025] Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Fokusdetektionssystems sowie einer Einrichtung zur gesteuerten Deformation eines Wafers gemäß einer Ausführungsform der Erfindung; und

[0026] Fig. 4 ist eine schematische Darstellung, die die Verwendung einer transparenten Planplatte bei der Projektionsbelichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung zeigt.

[0027] In Fig. 1 ist schematisch eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage in Form eines Wafer-Steppers 1 gezeigt, der zur Herstellung von hochintegrierten Halbleiterbauelementen vorgesehen ist. Die Projektionsbelichtungsanlage 1 umfasst als Lichtquelle einen Excimer-Laser 2 mit einer Arbeitswellenlänge von 157 nm, wobei auch andere Arbeitswellenlängen, beispielsweise 193 nm oder 248 nm möglich sind. Ein nachgeschaltetes Beleuchtungssystem 3 erzeugt in seiner Austrittsebene 4 ein großes, scharf begrenztes, sehr homogen beleuchtetes und an die Telezentriererfordernisse des nachgeschalteten Projektionsobjektivs 5 angepasstes Bildfeld. Das Beleuchtungssystem 3 hat Einrichtungen zur Auswahl des Beleuchtungsmodus und ist im Beispiel zwischen konventioneller Beleuchtung mit variablem Kohärenzgrad, Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung umschaltbar. Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung zum Halten und Manipulieren einer Maske 6 so angeordnet, dass diese in der Objektebene 4 des Projektionsobjektivs 5 liegt und in dieser Ebene zum Scanbetrieb in einer Abfahrtrichtung 7 bewegbar ist.

[0028] Hinter der auch als Maskenebene bezeichneten Ebene 4 folgt das Reduktionsobjektiv 5, das ein Bild der Maske mit reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 4:1 oder 5:1 oder 10:1, auf einen mit einer Photoresistschicht belegten Wafer 10 abbildet. Der als lichtempfindliches Substrat dienende Wafer 10 ist so angeordnet, dass die ebene Substratoberfläche 11 mit der Photoresistschicht im wesentlichen mit der Bildebene 12 des Projektionsobjektivs 5 zusammenfällt. Der Wafer wird durch eine Einrichtung 8 gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit der Maske 6 parallel zu dieser zu bewegen. Die Einrichtung 8 umfasst auch Manipulatoren, um den Wafer sowohl in z-Richtung parallel zur optischen Achse 13 des Projektionsobjektivs, als auch in x- und y-Richtung senkrecht zu dieser Achse zu verfahren. Eine Kippereinrichtung mit mindestens einer senkrecht zur optischen Achse 13 verlaufenden Kippachse ist integriert.

[0029] Das Projektionsobjektiv 5 hat als letzte, der Bildebene 12 nächste, transparente optische Komponente eine Plankonvexlinse 14, deren ebene Austrittsfläche 15 die letzte optische Fläche des Projektionsobjektivs 5 ist und in einem Arbeitsabstand 16 oberhalb der Substratoberfläche 11 angeordnet ist (Fig. 2).

[0030] Der Arbeitsabstand 16 ist deutlich kleiner als die Arbeitswellenlänge der Projektionsbelichtungsanlage und beträgt bei dieser Ausführungsform im zeitlichen Mittel ca. 10% der Arbeitswellenlänge bzw. zwischen ca. 10 und ca. 20 nm. Die Anlage ist so konfiguriert, dass ein Berührungskontakt zwischen Austrittsfläche 15 und Substratoberfläche 11 zuverlässig vermieden wird, um eine die Oberflächen schonende, kontaktlose Projektionslithografie zu ermöglichen.

[0031] Das Projektionsobjektiv 5 hat eine numerische Apertur NA von mehr als 0,90, bei manchen Ausführungsformen ist $NA > 1,0$. Die Apertur ist damit höher als bei der Immersionslithografie, da keine hochbrechende Flüssigkeit gebraucht wird. Eine maximale Apertur $NA = (0,95 \text{ Brechzahl des Resistes})$ im Bereich von ca. $NA = 1,7$ kann günstig sein. Unter den Bedingungen $NA \geq 1,0$ lassen sich bei herkömmlichen Projektionssystemen die schräg zur optischen Achse verlaufenden Rand- und Komastrahlen 17 für den Rand der Apertur nicht aus der Austrittsfläche 15 des Objektivs auskoppeln und damit nicht in die als Einkoppelfläche des Substrats dienende Substratoberfläche 11 einkoppeln, da im wesentlichen die gesamte schräg vom dichten Medium auf die Grenzfläche 15 auffallende Lichtintensität an dieser total reflektiert wird. Dieses Problem wird bei der Erfindung dadurch vermieden, dass der Arbeitsabstand 16 so klein gewählt wird, dass die Einkoppelfläche 11 des Substrats im Bereich des optischen Nahfeldes der Objektivaustrittsfläche 15 liegt. Wird der Abstand 16 zwischen Austrittsfläche 15 und Einkoppelfläche 11 so weit verringert, dass er wenigstens einmal während eines Belichtungszeitintervalls Werte von ca. 20% oder 15% oder 10% der Arbeitswellenlänge unterschreitet, so kann ein für die Belichtung ausreichender Lichtanteil 18 aus dem Objektiv ausgekoppelt und in das lichtempfindliche Substrat eingekoppelt werden. Beispielsweise erreicht der Einkoppelgrad bei einem Abstand von ca. 20% der Arbeitswellenlänge etwa 20%. Hier beginnt bei derzeit verfügbaren Resistmaterialien ein für die Lithografie nutzbarer Bereich.

[0032] Für einen zuverlässigen Belichtungsprozess mit geringen Toleranzen bezüglich der eingekoppelten Lichtintensität ist es notwendig, dass der Arbeitsabstand **16** im wesentlichen über die gesamte zu belichtende Fläche mit engen Toleranzen eingehalten wird. Um dies zu ermöglichen, wird bei der hier beschriebenen Ausführungsform eine Planarisierungstechnik verwendet, die unabhängig von der Oberflächentopografie des zu strukturierenden Halbleitermaterials eine im wesentlichen ebene Einkoppelfläche **11** für das Beleuchtungslicht bereit stellt. Im Beispiel der **Fig. 2** ist die Oberfläche des Wafers **10** bereits durch vorangegangene Prozessschritte stufig strukturiert. Auf die geätzte Oberflächenstruktur wird nun zunächst eine Schicht **20** aus Planarisierungslack aufgetragen, der für das Belichtungslicht transparent ist, jedoch unter Bestrahlung keine wesentliche Strukturänderungen erfährt. Die Planarisierungsschicht **20** hat eine im wesentlichen ebene Oberfläche **21**, auf die dann eine dünne Schicht **22** aus lichtempfindlichen Fotoresist aufgetragen wird, deren Schichtdicke gleichmäßig ist. Die nahezu optisch ebene freie Oberfläche **11** der Fotoresistschicht bildet die Einkoppelfläche für das aus dem Projektionsobjektiv ausgekoppelte Belichtungslicht. Bei einer nicht gezeigten Ausführungsform wird auf die gegebenenfalls vorstrukturierte Halbleiteroberfläche zunächst eine Schicht aus Fotoresist aufgetragen, bevor auf diese eine Schicht aus transparentem Planarisierungslack aufgetragen wird, dessen Oberfläche die Einkoppelfläche **11** bildet. In jedem Fall wird durch die Planarisierungstechnik eine weitgehend ebene Einkoppelfläche **11** geschaffen, die eine gleichmäßige Belichtung während der berührungsfreien Nahfeld-Projektionslithografie fördern.

[0033] Anhand von **Fig. 3** werden weitere für die berührungslose Nahfeld-Projektionslithografie förderliche Maßnahmen erläutert, die einzeln oder in Kombination bei Ausführungsformen erfindungsgemäßer Projektionsbelichtungssysteme vorgesehen sein können. Diese Maßnahmen umfassen eine hochpräzise Fokussiertechnik, die auch bei sehr geringen Arbeitsabständen mit hoher Messgenauigkeit arbeitet, sowie die Möglichkeit einer gezielten Deformation der zu belichtenden Substrate zur Einstellung einer im wesentlichen ebenen Substratoberfläche.

[0034] Bei der in **Fig. 3** gezeigten Ausführungsform des Projektionsobjektives hat dieses ein zweigeteiltes letztes optisches Element. Dieses umfasst eine Plankonvexlinse **320** mit sphärischer oder asphärischer Eintrittsfläche und ebener Austrittsfläche **321**, an die eine transparente Abschlussplatte **322** angesprengt oder über Immersion optisch angekoppelt ist. Zwischen der Plankonvexlinse **320** und der Abschlussplatte **322** befindet sich eine Mehrlagen- Einfach- oder Gradientenbeschichtung **323**, die für die Arbeitswellenlänge des Projektionsobjektives entspiegelnd wirkt und im sichtbaren Wellenlängenbereich, insbesondere bei ca. 633 nm, als Spiegelschicht wirkt. Die Abschlussplatte **322** hat eine mit ebenen Stufen versehene Austrittsseite, deren nach außen vorspringender Teil die Austrittsfläche **315** des Projektionsobjektives bildet. Am Rand der Austrittsseite sind Beschichtungen **324** aufgebracht, die für die Arbeitswellenlänge entspiegelnd und für sichtbares Licht, beispielsweise 633 nm, als Spiegelschicht wirken.

[0035] Bei dieser Ausführungsform wird die Abschlussplatte **322** als funktionaler, durchstrahlbarer Teil eines Fokusdetektionssystems **340** genutzt, das zur Erfassung von Abweichungen zwischen der Bildebene **312** des Projektionsobjektives und der im Bereich der Bildebene anzuordnenden Einkoppelfläche **311** des Wafers **310** dient. Auf Grundlage der Messergebnisse des interferometrischen Fokusdetektionssystems **340** kann die relative Lage zwischen Projektionsobjektiv und Wafer beispielsweise durch geeignetes Verfahren des Wafers in z-Richtung (parallel zur optischen Achse des Projektionsobjektives) und/oder durch Bewegung des Projektionsobjektives in Bezug auf den Waferhalter entlang der optischen Achse korrigiert werden. Das Fokusdetektionssystem umfasst eine Einkoppel-/Auskoppeloptik **341** mit einer Fizeau-Fläche **342**, einen Umlenkspiegel **343** und einen als Retroreflektor dienenden Spiegel **344**. Um das Messlicht des Fokusdetektionssystems (Laserlicht mit 633 nm Wellenlänge) in die Abschlussplatte **322** ein- und auskoppeln zu können, hat diese an ihrem Rande ebene, einander gegenüber liegende, Einkoppel-/Auskoppelflächen **345**, **346**, die so ausgerichtet sind, dass ein Messstrahl **347** des Fokusdetektionssystems im wesentlichen senkrecht zu den Einkoppelflächen ein- bzw. ausgekoppelt wird.

[0036] Das Fokusdetektionssystem **340** ist ein Interferometersystem, bei dem der Messstrahl **347** schräg auf die reflektierend wirkende Einkoppelfläche **311** des Substrats trifft und von dieser reflektiert wird. Abstandsänderungen zwischen Austrittsfläche **315** und Einkoppelfläche **311** machen sich als Weglängenveränderungen für den Messstrahl bemerkbar, die interferometrisch erfasst und ausgewertet werden können. Der Messstrahl wird über den Spiegel **343** und die Einkoppelfläche **345** schräg von unten in die Platte **322** eingekoppelt und hat innerhalb der Platte einen zickzackförmigen Strahlverlauf, bei dem der Messstrahl mehrfach zwischen der linsenseitigen Reflexbeschichtung **323** und Beschichtungen **324** an der Austrittsseite reflektiert wird. In zentralem Messbereich nahe der optischen Achse **312** des Systems tritt der Messstrahl aus der Platte **322** aus, trifft auf die Einkoppelfläche **311**, von der er reflektiert wird, und tritt danach wieder in die Abschlussplatte **322** ein. Nach Austritt aus der Auskoppelfläche **346** wird der Strahl durch Spiegel **344** in sich selbst reflektiert und ge-

langt nach mehrfacher Umlenkung zickzackförmig verlaufend in die Einkoppel-/Auskoppeloptik **341** zur Auswertung. Vorteilhafterweise ist die Apertur des interferometrischen Strahlenganges an den Arbeitsabstand **316** angepasst, wobei beispielsweise bei einem Arbeitsabstand $< \lambda/5$ die Apertur des interferometrischen Strahlenganges > 1 oder bei einem Abstand **316** von mehr als $4\lambda - 5\lambda$ die Apertur des interferometrischen Systems < 1 sein kann. Der Aufbau kann gegenüber einem Planspiegel kalibriert werden, der evtl. aus Silizium bestehen kann, wobei dieser selbst eine Oberflächengenauigkeit von besser als $PV < 5\text{ nm}$ haben sollte und in nm-Schritten positioniert werden kann. Da die Resistbrechzahlen sehr hoch sein können, kommt normalerweise ein ausreichend guter Reflex vom Resist.

[0037] Dadurch, dass das Austrittsende des Projektionsobjektivs als reflektierendes und lichtführendes Element in das Fokusedetektionssystem einbezogen wird, kann der Messstrahl **347** mit einem Einfallswinkel auf die Waferoberfläche **311** eingestrahlt werden, der wesentlich steiler ist als ein Einstrahlwinkel, der bei herkömmlichen Fokusedetektionssystemen möglich wäre, bei denen ein Messstrahl direkt mit streifendem Einfall zwischen die Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und der Waferoberfläche eingestrahlt wird. Somit kann trotz sehr geringem Arbeitsabstand eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden.

[0038] Um auch bei sehr dünnen und damit gegebenenfalls biegsamen Substraten, z.B. bei Halbleiterwafern, eine im wesentlichen ebene Einkoppelfläche **311** bereitstellen zu können, ist bei der gezeigten Ausführungsform eine Einrichtung **360** zur aktiven Unterstützung des Wafers durch geregelte Unterstützungspunkte vorgesehen, mit der bei Bedarf eine gezielte Deformation des Wafers durchgeführt werden kann. Die in die Substrathaltevorrichtung integrierte Einrichtung **360** umfasst eine Vielzahl von Unterstützungsgliedern **361**, die in einem regelmäßigen, zweidimensionalen Raster angeordnet sind und an ihren oberen Enden Unterstützungsflächen **362** haben, auf denen der abzustütze Wafer **310** aufliegt. Jedes der Unterstützungsglieder ist mit Hilfe eines elektrisch ansteuerbaren Stellgliedes, beispielsweise eines piezoelektrischen Elementes, unabhängig von den anderen Unterstützungsgliedern höhenverstellbar. Die Stellelemente werden von einer gemeinsamen Steuereinrichtung **363** angesteuert, die Eingangssignale verarbeitet, welche auf Messergebnissen des Fokusedetektionssystems **340** beruhen. Damit ist ein Regelkreis geschaffen, bei dem der Wafer nach Maßgabe von Ergebnissen einer Abstandsmessung und/oder einer Messung der Oberflächenform so verstellt und/oder deformiert werden kann, dass sich eine im wesentlichen ebene Einkoppelfläche **311** ergibt. Um sicher zu stellen, dass sich eine Verstellung der Unterstützungsglieder direkt auf eine Deformation des Wafers **310** auswirkt, sind die Unterstützungsglieder im Bereich ihrer Unterstützungsflächen so gestaltet, dass sie nach Art von Saugnäpfen an der Unterseite des Wafers angreifen können. Hierzu verläuft in jedem Unterstützungsglied **361** ein im Bereich der Unterstützungsfläche mündender Druckkanal **364**, der an eine nicht gezeigte Saugvorrichtung angeschlossen ist. Die Saugvorrichtung erzeugt im Kanalsystem **364** einen Unterdruck, der dafür sorgt, dass der Wafer **310** zuverlässig ohne abzuheben auf den Unterstützungsflächen der Unterstützungsglieder haftet. Um einen Substratwechsel zu erleichtern, kann das Drucksystem kurzzeitig auf Normaldruck oder Überdruck umgeschaltet werden, um ein Ablösen des Wafers von den Unterstützungsgliedern zu erleichtern oder aktiv zu fördern.

[0039] Die Einstellung eines gewünschten Flächenverlaufes der Einkoppelfläche **311** kann auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Es ist möglich, die zu belichtende Waferfläche **311** vor der Belichtung über entsprechende Messverfahren, beispielsweise interferometrisch oder mit Hilfe einer anderen optischen Entfernungsmessung, auf Oberflächendeformationen zu untersuchen und mit Hilfe der aktiven Waferunterstützung den Wafer so zu verformen, dass die Oberflächendeformation unter einem vorgegebenen Grenzwert bleibt, der beispielsweise auf $\leq 3\text{ nm}$ festgelegt werden kann. Ist die Waferfläche auf diese Weise eben eingestellt, kann fokussiert, gegebenenfalls gekippt und belichtet werden. Eine Deformation vor und/oder während der Laserbelichtung zur Einstellung eines gewünschten Flächenverlaufes ist auch bei gleichzeitiger Fokussierung und gegebenenfalls Verkipfung oder dergleichen möglich.

[0040] Die aktive Waferunterstützung mit der Möglichkeit einer gezielten Deformation der Einkoppelfläche **311** kann auch zur Petzvalkorrektur eingesetzt werden, falls bestimmte Restbeträge der Bildfeldkrümmung aus dem Projektionsobjektiv übrig bleiben. Daher kann die Einrichtung **360** z.B. auch dazu genutzt werden, für die Einkoppelfläche **311** einen nicht-unendlichen, großen Krümmungsradius (konvex oder konkav zum Objektiv) einzustellen. Für scannende Systeme kann auch eine zylindrische Krümmung eingestellt werden.

[0041] Systeme, die eine gezielte Deformation von Wafern erlauben, sind an sich bekannt. Beispiele sind in den Patenten US 5,094,536 oder US 5,563,684 gezeigt. Diese Systeme können bei entsprechender Modifikation auch bei Ausführungsformen der Erfindung genutzt werden. Der Offenbarungsgehalt dieser Dokumente wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

[0042] Aufgrund des geringen Arbeitsabstandes zwischen der Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und den mit UV-Licht zu bestrahlenden chemischen Substanzen kann es bei der berührungsfreien Nahfeld-Projektionslithografie zu einer schnellen Kontamination der Objektivaustrittsseite kommen, wodurch der Waferdurchsatz und die Abbildungsleistung vermindert werden können. Eine Möglichkeit zur Verminderung kontaminationsbedingter Nachteile besteht darin, als letztes optisches Element eine dünne Planplatte vorzusehen, die an das vorletzte Element angesprengt ist und durch Ablösen von diesem leicht ausgewechselt werden kann. Statt diese Wechselplatte anzusprenge, kann sie auch über eine Immersionsflüssigkeit mit dem letzten Linsenelement (Plankonvexlinse) in optischen Kontakt gebracht werden. Dieses auswechselbare Element kann als „Schmutzfang“ dienen und in geeignetem Zeitintervall abgelöst, gereinigt und erneut angesprengt oder angelegt oder durch ein anderes Element ersetzt werden. Ein nahtloser optischer Kontakt zwischen der auswechselbaren Platte und dem anschließenden optischen Element ist besonders wichtig, da nur auf diese Weise große numerische Aperturen, insbesondere mit Werten $NA > 1$, übertragen werden können.

[0043] Anhand von **Fig. 4** wird eine Möglichkeit erläutert, gleichzeitig eine ebene Einkoppelfläche bereitzustellen und Kontaminationsprobleme zu minimieren. Bei dieser Verfahrensvariante wird eine dünne oder eine dickere, aus transparentem Material bestehende Planparallelplatte **400** auf das zu belichtende Substrat **410** bzw. auf die Resistschicht aufgelegt. Bei dieser Variante wird der schmale, vom optischen Nahfeld zu überbrückende Überbrückungsgasraum (Arbeitsabstand **416**) zwischen der objektivseitigen Planfläche **411** der Planplatte und der vorzugsweise ebenen Austrittsfläche **415** des Objektivs gebildet. Dieser dünne Luftspalt von beispielsweise $\lambda/10 - \lambda/20$ befindet sich also nicht mehr unmittelbar vor der Resistschicht (oder einer Planarisierungsschicht) sondern in einem größerem Abstand, beispielsweise in der Größenordnung von einem oder mehreren Millimetern von dieser. Liegt die Planplatte direkt auf der Resistschicht oder einer Planarisierungsschicht auf, so kann es zu einem direkten optischen Kontakt und evtl. bereichsweise zu einem beinahe optischen Kontakt mit geringem Abstand kommen. Im zweiten Fall wird überwiegend ein optisches Nahfeld mit einem Abstand von deutlich kleiner als $\lambda/20$ der Arbeitswellenlänge vorliegen, so dass eine Belichtung über das Nahfeld möglich ist. Die als Hilfsplatte dienende Planplatte **400** kann mehrfach verwendet werden und sollte nach jedem Belichtungszyklus sorgfältig gereinigt werden. Die planparallele Platte **400** ist vorzugsweise so dimensioniert, dass die gesamte zu belichtende Oberfläche des Substrats bedeckt wird; dementsprechend können Hilfsplatten für die Halbleiterstrukturierung Durchmesser im Bereich zwischen ca. 200 mm und ca. 300 mm oder darüber haben. Es ist möglich, die Hilfsplatte direkt nach dem Auftragen und Trocknen des Resistmaterials in Vakuum auf die Resistschicht aufzulegen und den Wafer mit aufgelegter Hilfsplatte in die Substrathaltevorrichtung einzubauen.

[0044] Wird die Planplatte **400** ausreichend dick und biegesteif gemacht, kann es genügen, den zu belichtenden Bereich des Substrates an die substratseitige Planfläche **421** anzudrücken. Hierzu umfasst die Substrathaltevorrichtung der gezeigten Ausführungsform eine Druckvorrichtung **440**, die mehrere Druckkanäle umfasst, die im Waferbelichtungsbereich, d.h. im Bereich der optischen Achse des Projektionsobjektivs an der ebenen Oberfläche **441** der Substrathaltevorrichtung in Drucktaschen **442** münden. Die Relativverschiebung zwischen dem zu belichtenden Substrat und dem Projektionsobjektiv erfolgt bei dieser Variante zwischen der stabilen Hilfsplatte **400** und der planen Austrittsfläche **415** des Lithografieobjektivs.

[0045] Während im gezeigten Beispiel die Planplatte **400** direkt auf die Fotoresistschicht ohne Abstand aufgelegt wird, ist es auch möglich, auf einen planarisierten, aber unbelichteten Wafer eine Planparallelplatte unter Zwischenschaltung eines Immersionsfluides, beispielsweise einer geeigneten Immersionsflüssigkeit aufzulegen. Die Relativverschiebung erfolgt weiterhin über den geringen Spalt **416**, der sich wenige Millimeter über der Bildebene **412** befindet. Diese Variante hat den Vorteil, dass es trotz Verwendung eines Immersionsfluides möglich ist, die Belichtung mit bekannt hohen Geschwindigkeiten durchzuführen. Das Einbringen und Entfernen von Immersionsfluid kann außerhalb des Scanners durchgeführt werden, beispielsweise zeitlich parallel zu einer aktuellen Belichtung. Mit dieser Variante kann es möglich sein, auch für Aperturen $NA > 1,0$ den heute erreichbaren Waferdurchsatz von beispielsweise ca. 140 Wafers (mit 300 mm Durchmesser) pro Stunde zu erreichen. Dies entspricht einem Durchsatz, der derzeit nur bei Aperturen $< 1,0$ möglich ist.

[0046] Um ein zufälliges Ansprengen der Teile zwischen der Hilfsplatte **401** und der Austrittsfläche **415** des Projektionsobjektivs bei unkontrollierten Abstandsänderungen zu vermeiden, ist bei der gezeigten Ausführungsform vorgesehen, sowohl die Austrittsfläche **415** des Projektionsobjektivs, als auch die objektivseitige Planfläche **411** der Hilfsplatte **400**, mit einer dünnen Schicht **450**, **451** aus Magnesiumfluorid zu belegen, die als optisch neutrale Schutzschicht ausgelegt ist und beispielsweise eine optische Schichtdicke von λ haben kann.

[0047] Das anhand weniger Beispiele erläuterte Projektionssystem der Erfindung ermöglicht Projektionsbe-

lichtungen mit höchsten Aperturen, insbesondere auch mit Aperturen $NA > 1$, beispielsweise $NA = 1,1$ oder darüber bis hin zu $NA = 1,7$. Für die berührungsfreie Nahfeld-Projektionslithografie können sowohl rein refraktive (dioptrische), als auch katadioptrische Projektionsobjektive genutzt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellen einer Maske mit einem vorgegebenen Muster in einer Objektebene eines Projektionsobjektivs;
Bereitstellen eines lichtempfindlichen Substrats im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs;
Beleuchten des Musters mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Arbeitswellenlänge;
Projektion eines Bildes des Musters auf das lichtempfindliche Substrat mit Hilfe des Projektionsobjektivs;
Einstellen eines endlichen Arbeitsabstandes zwischen einer dem Projektionsobjektiv zugeordneten Austrittsfläche für Belichtungslicht und einer dem Substrat zugeordneten Einkoppelfläche für Belichtungslicht, wobei der Arbeitsabstand innerhalb eines Belichtungszeitintervalls mindestens zeitweise auf einen Wert eingestellt wird, der kleiner ist als eine maximale Ausdehnung eines optischen Nahfeldes des aus der Austrittsfläche austretenden Lichtes.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mindestens zeitweise ein Arbeitsabstand eingestellt wird, der weniger als das Vierfache der Arbeitswellenlänge beträgt, vorzugsweise wenigstens zeitweise weniger als ca. 50% der Arbeitswellenlänge, insbesondere wenigstens zeitweise ca. 20% oder weniger der Arbeitswellenlänge.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine Beschichtung des Substrats mit mindestens einer Planarisierungsschicht zur Erzeugung einer im wesentlichen ebenen, als Einkoppelfläche nutzbaren Substratoberfläche.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer optischen Erfassung von Abweichungen zwischen der Bildebene des Projektionsobjektivs und der Einkoppelfläche, wobei die Erfassung vorzugsweise eine schräge Einstrahlung mindestens eines Messstrahls in einen Zwischenraum zwischen der Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und der Einkoppelfläche sowie eine Erfassung des Messstrahls nach Reflexion an der Substratoberfläche umfasst und die Einstrahlung derart durchgeführt wird, dass der Messstrahl vor der Erfassung mindestens einmal an der Substratoberfläche und mindestens einmal an einer für das Messlicht reflektierenden Reflexionsfläche des Projektionsobjektivs reflektiert wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem das letzte optische Element des Projektionsobjektivs als durchstrahlbarer, strahlführender Bestandteil eines Fokusdetektionssystems genutzt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine gesteuerte Deformation des Substrates zur Erzeugung einer vorgebbaren Form der Substratoberfläche, insbesondere zur Erzeugung einer im wesentlichen ebenen, als Einkoppelfläche nutzbaren Substratoberfläche.

7. Verfahren nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch eine aktive Unterstützung des Substrats auf mindestens drei Unterstützungsflächen von Unterstützungsgliedern und durch eine Verstellung einer Axialposition von mindestens einer der Unterstützungsflächen relativ zu anderen Unterstützungsflächen zur Einstellung einer gewünschten Form der Substratoberfläche.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, gekennzeichnet durch eine gesteuerte Deformation des Substrats vor der Belichtung und/oder während der Belichtung.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8 mit:
Anpressen des Substrats auf Unterstützungsflächen von mindestens drei Unterstützungsgliedern durch Erzeugung eines Unterdruckes an einer der Einkoppelfläche abgewandten Seite des Substrats.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit:
Optisches Kontaktieren einer dünnen transparenten Platte mit einem vorletzten optischen Element des Projektionsobjektivs derart, dass das letzte optische Element, an dem sich die Austrittsfläche befindet, durch die dünne Platte gebildet wird;
Durchführen von mindestens einer Belichtung;
Auswechseln der dünnen Platte, insbesondere zur Beseitigung von Plattendegradation, insbesondere von

Kontaminationen an der Austrittsflächen.

11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das optische Kontaktieren durch Ansprenge n erfolgt.
12. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das optische Kontaktieren mit Hilfe einer Immersionsflüssigkeit, insbesondere Reinstwasser, durchgeführt wird, die zwischen das vorletzte optische Element und die dünne Platte eingebracht wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit:
Auflegen einer transparenten Planplatte auf das Substrat derart, dass eine dem Substrat abgewandte, objektivseitige Planfläche der Planplatte die Einkoppelfläche bildet.
14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem die Planplatte so auf das Substrat aufgelegt wird, dass sie mindestens bereichsweise in Berührungskontakt mit einer Oberseite des Substrats steht.
15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, bei dem ein Bereich zwischen einer substratseitigen Planfläche der Planplatte und der Oberseite des Substrats durch ein Immersionsmedium teilweise oder vollständig gefüllt wird, wobei vorzugsweise als Immersionsmedium Reinstwasser verwendet wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, bei dem eine Planplatte verwendet wird, die im wesentlichen die gesamte zu belichtende Fläche des Substrats abdeckt, wobei vorzugsweise bei der Belichtung eine Relativverschiebung zwischen dem Projektionsobjektiv und der Planplatte durchgeführt wird, um sukzessive alle Bereiche des zu belichtenden Substrats zu belichten.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 16, gekennzeichnet durch eine aktive Anpressung des Substrats an eine substratseitige Planfläche der Planplatte zur Erzeugung eines Berührungskontaktes zumindest während der Belichtung.
18. Projektionsbelichtungssystem zur Abbildung eines in einer Objektebene eines Projektionsobjektives angeordneten Musters in die Bildebene des Projektionsobjektives mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Arbeitswellenlänge,
wobei das Projektionsobjektiv eine Vielzahl von optischen Elementen umfasst, die entlang einer optischen Achse (**13, 313**) angeordnet sind und ein dem Projektionsobjektiv zugeordnetes letztes optisches Element (**14, 322**) des Projektionsobjektives umfassen, das eine Austrittsfläche (**15, 315, 415**) des Projektionsobjektives bildet,
wobei das Projektionsobjektiv so ausgelegt ist, dass ein endlicher Arbeitsabstand (**16, 316, 416**) zwischen der Austrittsfläche und der Bildebene (**12, 312, 412**) kleiner ist als eine maximale Ausdehnung eines optischen Nahfeldes des aus der Austrittsfläche austretenden Lichtes.
19. Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 18, bei dem der Arbeitsabstand weniger als das Vierfache der Arbeitswellenlänge beträgt, vorzugsweise weniger als ca. 50% der Arbeitswellenlänge, insbesondere ca. 20% oder weniger der Arbeitswellenlänge.
20. Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 18 oder 19, bei dem das Projektionsobjektiv (**5**) eine bildseitige numerische Apertur $NA > 0,85$ hat, wobei vorzugsweise $NA > 0,95$, insbesondere $NA \geq 1$ ist.
21. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 16 bis 18, gekennzeichnet durch ein Fokusedektionssystem (**340**) zur optischen Erfassung von Abweichungen zwischen der Bildebene des Projektionsobjektives und einer im Bereich der Bildebene anzuordnenden Einkoppelfläche (**11, 311**) mit:
einem Einkoppelsystem zur schrägen Einstrahlung mindestens eines zur Reflexion an der Einkoppelfläche (**11, 311**) vorgesehenen Messstrahls (**347**) in einen Zwischenraum zwischen der Austrittsfläche (**15, 315**) des Projektionsobjektives und der Einkoppelfläche (**11, 311**); und
einem Auskoppelsystem zur Erfassung des Messstrahls nach Reflexion an der Einkoppelfläche (**11, 311**);
wobei das Einkoppelsystem und das Auskoppelsystem derart ausgebildet und angeordnet sind, dass der Messstrahl vor Eintritt in das Auskoppelsystem mindestens einmal an der dem Substrat zugeordneten Einkoppelfläche (**11, 311**) und mindestens einmal an einer für das Messlicht reflektierenden Reflexionfläche (**324, 323**) des Projektionsobjektives reflektiert wird.
22. Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 21, bei dem die letzte optische Komponente (**322**) des Projektionsobjektives eine Austrittsseite hat, die in mindestens einem Bereich eine für das Messlicht der Fo-

kusdetektionseinrichtung reflektierende Beschichtung (324) aufweist, wobei die Beschichtung vorzugsweise für die Arbeitswellenlänge des Projektionsobjektives reflexionsmindernd wirkt.

23. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 21 oder 22, bei dem das Fokusdetektionssystem (340) eine letzte optische Komponente (322) des Projektionsobjektives als durchstrahlbarer, strahlführender Teil umfasst.

24. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 21 bis 23, bei dem das Projektionsobjektiv eine letzte optische Komponente (322) mit einem Randbereich hat, in dem an mindestens einer Stelle eine schräg zur optischen Achse (313) ausgerichtete, ebene Einkoppelfläche und/oder Auskoppelfläche (345, 346) für einen Messstrahl (347) des Fokusdetektionssystems ausgebildet ist.

25. Projektionsbelichtungsanlage nach einem der Ansprüche 18 bis 24, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (360) zur aktiven Unterstützung des Substrats (310), wobei die Einrichtung für eine gesteuerte Deformation des Substrats zur Erzeugung einer vorgebbaren, insbesondere ebenen Form der Substratoberfläche (311) eingerichtet ist.

26. Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 25, bei dem die Einrichtung (360) eine Vielzahl von Unterstützungsgliedern (361) mit Unterstützungsflächen (362) für das Substrat (310) umfasst, wobei Unterstützungsglieder unabhängig voneinander höhenverstellbar sind.

27. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 25 oder 26, bei dem die Einrichtung (360) eine Saugeinrichtung zur aktiven Ansaugung des Substrats (310) an die Unterstützungsflächen (362) der Unterstützungsglieder (361) umfasst.

28. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 25 bis 27, bei dem die Einrichtung (360) zur aktiven Unterstützung des Substrats (310) nach Maßgabe von Messsignalen eines Fokusdetektionssystems (340) steuerbar ist.

29. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 18 bis 28, dem mindestens eine auf dem Substrat (410) anordenbare, aus einem für das Licht der Arbeitswellenlänge transparenten Material bestehende Planplatte (400) zugeordnet ist, die derart auf dem Substrat anordenbar ist, dass eine objektivseitige Planfläche (411) der Planplatte die Einkoppelfläche bildet.

30. Projektionsbelichtungssystem nach Anspruch 29, bei dem die Planplatte (400) so dimensioniert ist, dass sie im wesentlichen die gesamte zu belichtende Oberfläche des Substrats bedeckt, wobei die Planplatte vorzugsweise einen Durchmesser von mindestens 150 mm, vorzugsweise mindestens 200 mm, insbesondere von ca. 200 mm bis ca. 300 mm hat.

31. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 18 bis 30, bei dem an der Austrittsfläche (415) des Projektionsobjektives und/oder an einer objektivseitigen Planfläche (411) der Planplatte (400) eine Beschichtung (450, 451) zur Verhinderung von Ansprengen der Flächen aneinander bei Berührungskontakt aufgebracht ist, wobei die Beschichtung vorzugsweise aus Magnesiumfluorid besteht.

32. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 18 bis 31, bei dem eine Substrathaltevorrichtung (410) zum Halten des Substrats eine Druckvorrichtung (440) zur Erzeugung eines Überdrucks zwischen einer vorzugsweise ebenen Oberfläche (441) der Substrathaltevorrichtung und einem aufgelegten Substrat (410) umfasst.

33. Projektionsbelichtungssystem nach einem der Ansprüche 18 bis 32, das für eine Arbeitswellenlänge von weniger als 260 nm ausgelegt ist, insbesondere für 248 nm, 193 nm, oder 157 nm.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

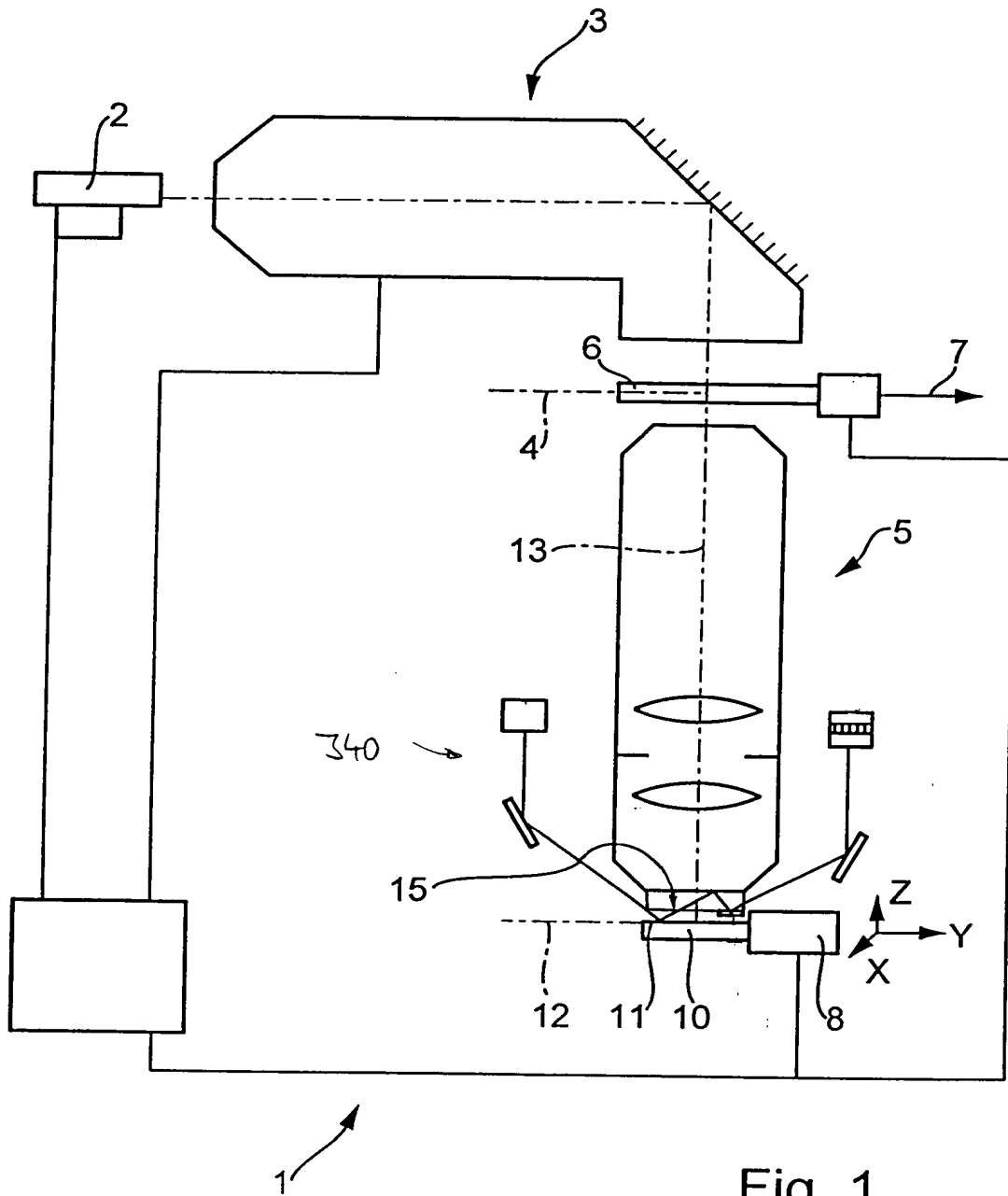


Fig. 1

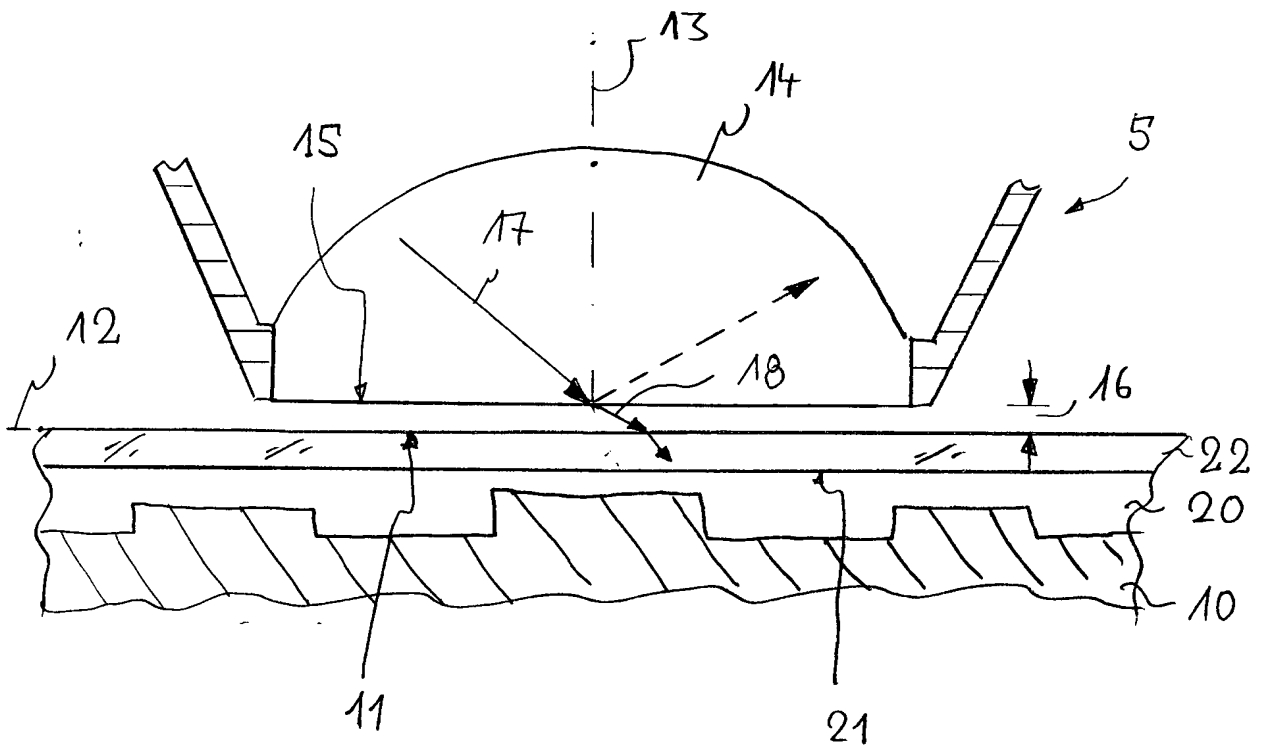


Fig. 2

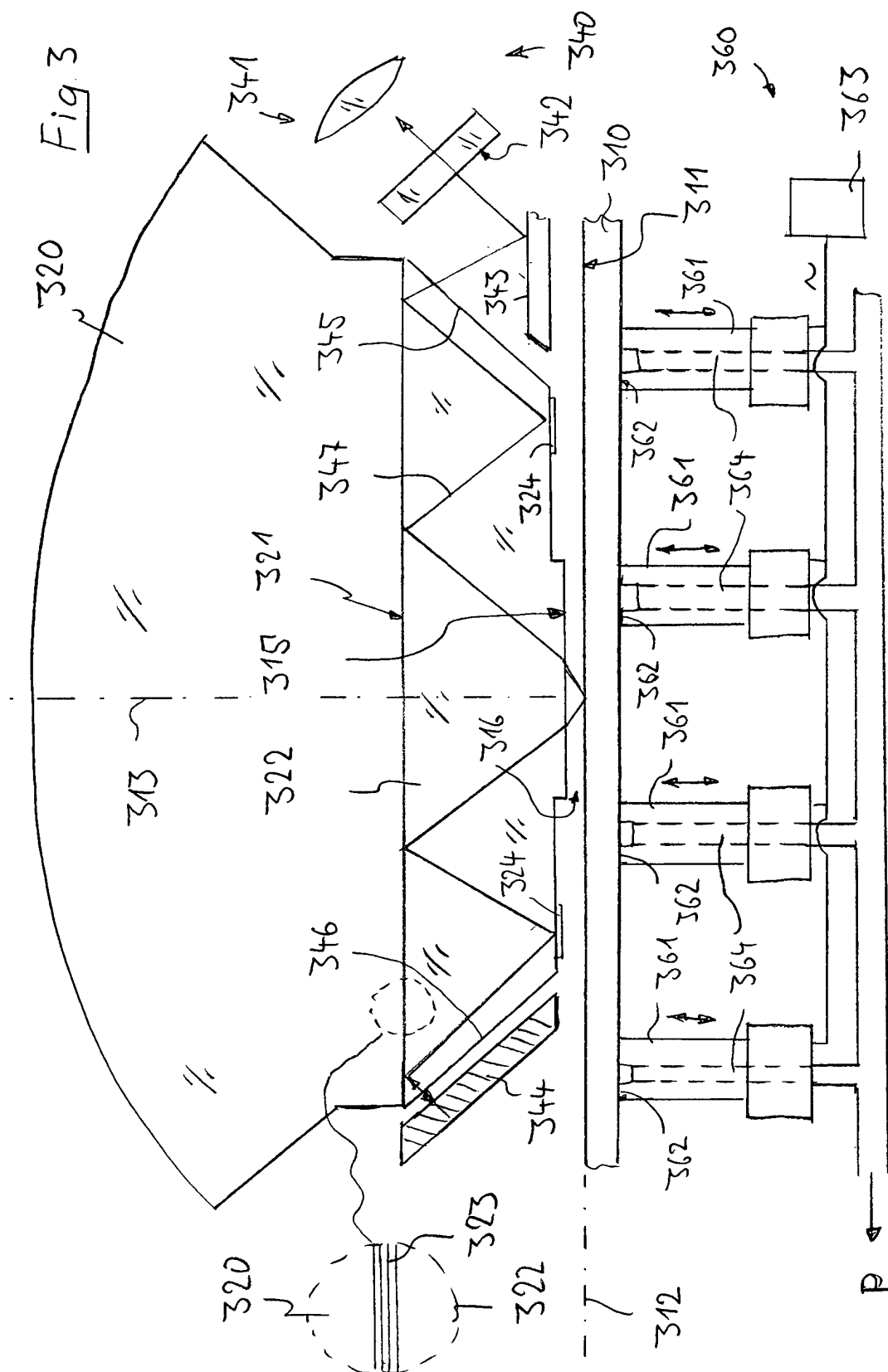


Fig. 4

